

مقاله پژوهشی

تحلیل نرم‌افزاری پاسخ هارمونیک میوه پرتقال به منظور تعیین فرکانس‌های طبیعی برای جلوگیری از آسیب در هنگام حمل و نقل

وحید کهریزی^{۱*}، ابراهیم احمدی^۲ و علیرضا شوشتری^۳

۱- دکترای مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان و مدیر هنرستان زنده‌یاد ادهم مظفری، کامیاران، ایران
۲ و ۳- به ترتیب: استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم؛ و استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

چکیده

طراحی و توسعه ماشین‌های کشاورزی به طور مستقیم با خواص بیولوژیکی محصولات کشاورزی در ارتباط است. مهندسان و طراحان اگر به ویژگی‌های دینامیکی آگاهی نداشته باشند باید با روش‌های تجربی به طراحی ماشین‌های کشاورزی و تجهیزات پردازند که این امر از لحاظ زمان و هزینه ناکارآمد است. هدف از این مطالعه شناسایی فرکانس‌های طبیعی در دو گروه کوچک و بزرگ میوه پرتقال رقم تامسون با استفاده از آنالیز مودال اجزای محدود و تابع پاسخ هارمونیک با نرم‌افزار انسیس است. برای به دست آوردن داده‌های مورد نیاز در شبیه‌سازی، آزمون ضربه با دستگاه پاندول اجرا شد. مدل هندسی سه‌بعدی میوه پرتقال در نرم‌افزار انسیس (Ansys) ترسیم شد و به طور جداگانه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی پوست و گوشت میوه پرتقال تعیین گردید. به منظور اعتبارسنجی فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از آنالیز مودال با استفاده از آنالیز پاسخ هارمونیک و داده‌های شتاب‌سنج سه محوره با تعیین کردن محدوده فرکانسی و نیز وارد کردن مقادیر داده‌های شتاب‌سنج در نرم‌افزار انسیس، نمودار فرکانس طبیعی بر حسب شتاب رسم گردید. اختلاف بین فرکانس‌های تجربی و آنالیز مودال برای هر دو گروه از قابلیت اعتماد بالایی برخوردار است به طوری که ضریب تعیین (R2) ناشی از مقایسه فرکانس‌های تجربی و آنالیز مودال برای پرتقال‌های گروه بزرگ و کوچک به ترتیب ۰/۹۵۵۹ و ۰/۹۶۸۲ است. بنابراین، مدل اجزای محدود و روش تجربی مورد استفاده در این مطالعه می‌تواند به عنوان روشی با صرفه و قابل اعتماد به منظور طراحی ماشین‌های برداشت میوه پرتقال و بهینه‌سازی مکانیزم‌های پس از برداشت و حمل و نقل استفاده شود.

واژه‌های کلیدی

صدمات دینامیکی، مکانیزم‌های پس از برداشت، مودهای ارتعاشی

مقدمه

زیادی تا رسیدن به درک دقیق و اساسی از خواص و رفتارهای محصولات لازم است. مطالعات نشان می‌دهد، عملیات برداشت و فرآیندهای پس از برداشت، عامل اصلی ضایعات وارد شده به محصولات کشاورزی است (Chiputula, 2009). محسنین

امروزه فناوری‌های مرتبط با تجهیزات کشاورزی و صنایع غذایی به منظور پاسخگویی به نیاز روزافزون مواد غذایی پیشرفت‌های زیادی داشته است. با وجود این پیشرفت‌های فنی و مهندسی، هنوز تلاش‌های

اجزای محدود تصادفی^۳ بررسی کردند و نشان دادند که از مدل المان محدود می‌توان پاسخ طبیعی فرکانس‌های طبیعی و موده‌های ارتعاشی را به منظور طراحی ماشین‌های برداشت میوه خرما استفاده کرد.

در تحقیقی با استفاده از روش اجزای محدود، پاسخ دینامیکی غده‌های سیب‌زمینی را در بارگذاری ضربه‌ای مطالعه کردند. در این مطالعه غده‌های سیب‌زمینی را از ارتفاع ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ میلی‌متری روی صفحه‌ای صلب رها می‌کردند و پاسخ دینامیکی بر اثر ضربه را با استفاده از روش اجزای محدود بررسی کردند. نتایج تحقیق نشان داد که شبیه‌سازی نتایج به شدت به مدول الاستیسیته وابسته است. این محققان نتیجه‌گیری کردند که از این مطالعه می‌توانند برای وقوع آسیب‌های دینامیکی و حل مسائل مهندسی کشاورزی با توجه به انواع مواد کشاورزی استفاده کرد (Gao et al., 2018).

امروزه با توجه به گسترش دانش کامپیوتری و در دسترس بودن این فناوری می‌توان برای حل مسائل پیچیده با استفاده از طراحی به کمک کامپیوتر^۴ بدون نیاز به واقعیت فیزیکی، آن را شبیه‌سازی کرد (Celik et al., 2011). با این حال، تاکنون شبیه‌سازی آنالیز هارمونیک میوه پرتقال با استفاده از آنالیز مودال اجزای محدود تحت بار ضربه‌ای گزارش نشده است. هدف از این تحقیق، تحلیل دینامیکی میوه پرتقال در مقابل صدمات ناشی از ضربه به کمک شبیه‌سازی المان محدود است. همچنین نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزاری با نتایج آزمایش‌های تجربی اعتبارسنجی شده است.

(Mohsenin, 1978). اثر فرکانس، شتاب و زمان ارتعاش را بر میزان آسیب‌دیدگی میوه‌ها هنگام حمل و نقل را مؤثر دانسته است. متوسط ضایعات میوه‌ها در فرآیند حمل و نقل بین ۳۰ تا ۴۰ درصد گزارش شده است (Anon, 2015).

برای تعیین مقاومت میوه‌های تازه و سبزی‌های ریشه‌ای^۱ تحت بارهای ضربه‌ای تحقیقات متعددی شده است، برای مثال، در طول درجه‌بندی (Jung & Aliasgarian et al., 2015)، حمل و نقل (Park, 2012; Soleimani & Ahmadi 2014) و بسته‌بندی (Albaar et al., 2016).

در تحقیقی، فرکانس‌های طبیعی میوه پرتقال با استفاده از آنالیز مودال اجزای محدود بررسی و با استفاده از نرم‌افزار solidwork مدل سه بعدی میوه پرتقال را ایجاد کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که از روش اجزای محدود می‌توان با دقت حداقل ۹۱ درصد به منظور تعیین فرکانس‌های طبیعی میوه پرتقال استفاده کرد (Namdari Gharaghani et al., 2020).

در پژوهشی رفتار دینامیکی قهوه با استفاده از آنالیز مودال اجزای محدود ارزیابی شد. فرکانس‌های استخراج شده از شبیه‌سازی‌ها با فرکانس‌های تجربی (آزمایشگاهی) به منظور اعتبارسنجی مدل مورد بررسی کردند و نشان دادند فرکانس‌های طبیعی تجربی برای میوه قهوه در محدوده ۱۰ تا ۳۰ هرتز است و همبستگی نسبتاً قوی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد (Velloso et al., 2020).

سانتوس و همکاران (Santos et al., 2021) ویژگی‌های مودال میوه خرما، ماکائو^۲ را به روش

1- Fruits and Root Vegetables

2- Macaw

3- Stochastic Finite Element Method

4- Computer aided design

مواد و روش‌ها

تهیه نمونه‌ها و اجرای آزمایش‌ها

برای اجرای آزمایش‌ها، تعداد معینی پرتقال رقم تامسون^۱ از پژوهشکده مرکبات و میوه‌های نیمه گرمسیری در شهرستان رامسر در استان مازندران برداشت شد. برای جلوگیری از وارد آمدن هرگونه آسیب به میوه، آنها به صورت دستی برداشت شدند. پرتقال‌ها به دقت در جعبه‌های پلاستیکی به صورت یک ردیفه قرار داده شدند تا به آزمایشگاه خواص مکانیکی و رئولوژی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینا قرار داده شدند. میوه‌ها در یخچال در دمای ۴ درجه سلسیوس نگه‌داری شدند. پرتقال‌ها در دو دسته با اندازه‌های کوچک و بزرگ جداسازی شدند و پیش از آزمایش‌ها، پرتقال‌ها در دمای محیط آزمایشگاه قرار داده می‌شدند تا با محیط هم‌دم شوند.

آزمایش‌های ضربه‌ای

در این پژوهش به منظور بررسی آنالیز پاسخ هارمونیک میوه پرتقال تحت بارهای دینامیکی، از آزمون ضربه با به کارگیری پاندول استفاده شد. این دستگاه مجهز به حسگرهای نیروسنج (PCB 208c02, PCB Pizotronics, USA, sensitivity: 10.97 mV/N) و شتاب‌سنج سه محوری پیزوالکتریک (PCB 356A26, PCB Pizotronics, USA, sensitivity: 50.1 mV/g (X), 50.6 mV/g (Y), 49.08 mV/g (Z)) تحت زاویه‌های مختلف با استفاده از ضربه‌زن به پرتقال نیرو وارد می‌شود و داده‌های نیروی برخورد و شتاب در راستای سه محور در مدت زمان اعمال ضربه با استفاده از دستگاه چهار کاناله پردازش سیگنال (ECON, AVANT Lite, model: MI-6004)

استخراج می‌شود (Ahmadi & Barikloo, 2016)

a, b)

پیش از انجام آزمایش‌های پاندولی، نقطه تسلیم دینامیکی برای نمونه‌های پرتقال تعیین شد. نقطه تسلیم بیولوژیک^۲ در محصولات کشاورزی، معادل نقطه تسلیم^۳ در مواد و مصالح مکانیکی است و نقطه‌ای است در منحنی تنش-کرنش که افزایش تنش پس از آن نقطه باعث ایجاد تغییر شکل دائمی در محصول می‌گردد. به عبارت دیگر، این نقطه مرز بین مرحله الاستیک (برگشت‌پذیر) و پلاستیک (برگشت‌ناپذیر) محصول به شمار می‌رود. مقدار انرژی ضربه در نقطه تسلیم بیولوژیک را انرژی ضربه بحرانی^۴ می‌نامند. تعیین نقطه تسلیم بیولوژیک و انرژی ضربه بحرانی اهمیت بالایی در آزمون ضربه پاندول دارد.

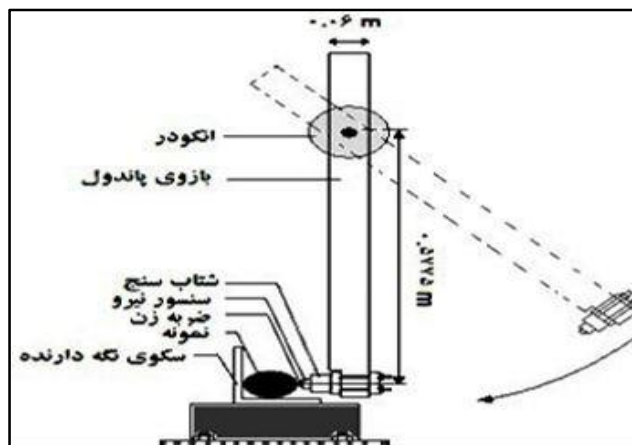
برای تعیین نقطه تسلیم دینامیکی، ۲۰ پرتقال با شعاع انحنای تقریباً یکسان انتخاب شد. آزمون ضربه با زاویه پاندول ۷ درجه آغاز و به تدریج با افزایش یک درجه به ازای هر ضربه، تا ۱۰ درجه ادامه یافت. به منظور فراهم کردن شرایط برای اثرهای ضربه، با اجرای پیش‌آزمون‌های متعدد، فاصله زمانی تکرار ضربات بعدی در همان نقطه، ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شد. بر اساس روش سعی و خطا، نقطه تسلیم دینامیکی تحت زاویه ۱۰ درجه برای میوه پرتقال رقم تامسون تعیین گردید. بر این اساس، در این مطالعه سه سطح ضربه در نظر گرفته شد، به طوری که سطح ضربه اول زیر نقطه تسلیم، سطح دوم در محدوده نقطه تسلیم و سطح سوم بالای نقطه تسلیم بیولوژیک هستند. هر سطح ضربه در ۲۰ تکرار و در مجموع ۶۰ آزمون ضربه اجرا شد (شکل ۱).

1- Tamson

3- Yield point

2- Bioyield point

4- Critical impact energy



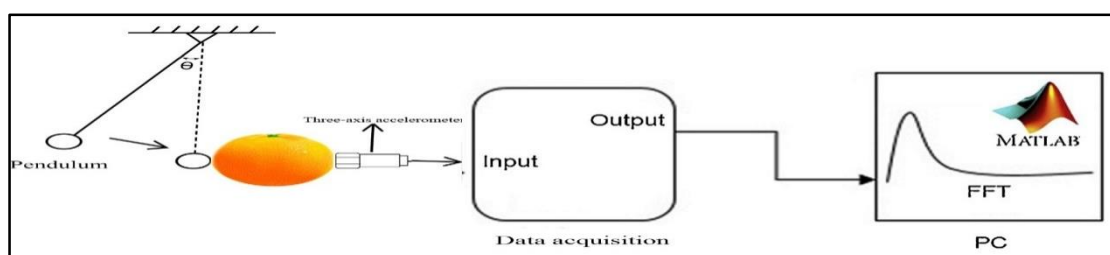
شکل ۱- تعیین نقطه تسلیم دینامیکی

Fig. 1 - Determining the dynamic yield point

دینامیکی توسط حسگر شتاب‌سنج سه محوره (خروجی) به دستگاه پردازش سیگنال ارسال و سپس در کامپیوتر ذخیره شد (شکل ۲).

انتقال داده‌ها از حوزه زمان به حوزه فرکانس، با استفاده از نرم‌افزار متلب^۱ و کدنویسی در این نرم‌افزار و استفاده از تبدیل فوریه سریع^۲ (FFT) صورت گرفت. تعداد کل آزمایش‌ها برای هر یک از نمونه‌های کوچک و بزرگ میوه پرتقال کاملاً تصادفی بود.

به منظور اجرای آزمایش‌های تجربی و استخراج پارامترهای مودال، میوه پرتقال مطابق شکل ۱ با استفاده از یک نخ از سقف آویزان شد. ضربه وارد بر نمونه‌های پرتقال تحت سه زاویه ۷، ۱۰ و ۲۰ درجه به ترتیب زیر نقطه تسلیم، نقطه تسلیم دینامیکی و بالای نقطه تسلیم دینامیکی وارد گردید. برای هر یک از زوایه‌های گفته شده، در راستای قطبی و استوایی به نمونه‌های پرتقال نیرو (ورودی) وارد شد به طوری که دقیقاً در طرف مقابل نیروسنج، پاسخ



شکل ۲- شماتیک آزمایش پاندولی (ضربه‌ای) برای میوه پرتقال تحت زوایه‌های مختلف

Fig. 2- Schematic of pendulum test for orange fruit at different angles

محدود، مدل الاستیک خطی با تعیین مدول الاستیسیته و نسبت پواسون و همچنین با فرض ماده به صورت همگن است (Yousefi *et al.*, 2016; Celik *et al.*, 2011).

مدل‌سازی عددی میوه پرتقال با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار انسیس رایج‌ترین مدل مورد استفاده برای شبیه‌سازی محصولات کشاورزی با استفاده از روش اجزای

1- Matlab

2- Fast Fourier Transform

پرتقال در حوزه الاستیک خطی محاسبه شد. همچنین نسبت پواسون در این پژوهش مطابق مقاله (Gyasi *et al.*, 1981) برای گوشت و پوست میوه پرتقال به ترتیب ۰/۴۴۹ و ۰/۳۴۰ در نظر گرفته شد (جدول ۱).

به دلیل نبود تعریف ویژگی محصولات غذایی و کشاورزی در نرم‌افزارهای مهندسی (از جمله نرم‌افزار انسیس) در قسمت داده‌های مهندسی در این نرم‌افزار مقادیر چگالی و مدول الاستیسیته به طور جداگانه برای گوشت و پوست میوه

جدول ۱- ویژگی‌های مکانیکی گوشت و پوست میوه پرتقال

Table 1- Mechanical properties of orange fruit flesh and peel

چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب) Density (Kgm ⁻³)	مدول الاستیسیته (مگا پاسکال) modulus of elasticity (Mpa)	نسبت پواسون - Poisson's ratio	
890	0.4	0.449	گوشت (flesh)
910	1.12	0.340	پوست (skin)

جرم واقعی به دست آمده از وزن ۳۰ نمونه پرتقال از گروه‌های بزرگ و کوچک تفاوت جزئی (کمتر از ۴ گرم) دارند. پس از تعریف ماده و ایجاد مدل هندسی سه بعدی، مرحله شبکه‌بندی است. با توجه به اینکه ویژگی‌های المان‌ها در تحلیل المان محدود تاثیر زیادی دارد، باید شبکه‌بندی با اندازه و انواع مختلف المان صورت گیرد. کیفیت شبکه‌بندی در کنار تعیین درست شرایط مرزی که در مرحله بعد از شبکه‌بندی خواهد بود، تاثیر بسیار زیادی در دقت و پایداری حل دارد. نوع المان به لحاظ ساختار و با توجه به نوع تحلیل، هندسه شکل، مزیت‌های خود المان و نرم‌افزار اجزای محدود مورد نظر تعیین می‌شود. به طور کلی المان‌های سه بعدی به صورت هرمی^۳ یا مکعبی^۴ با درجه ۱ یا ۲ هستند (شکل ۳). اگر شبکه‌بندی کیفیت مناسبی نداشته باشد، همگرا کردن حل بسیار مشکل خواهد بود (Malalasekera *et al.*, 2007).

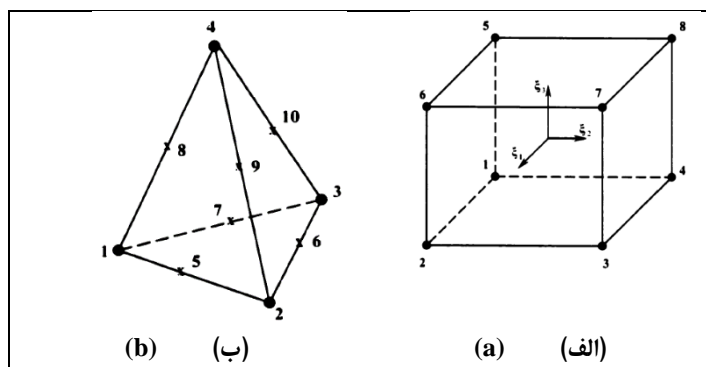
به منظور شبیه‌سازی میوه پرتقال، ابتدا در ماژول مودال نرم‌افزار انسیس پس از ایجاد مدل هندسی سه بعدی، ویژگی‌های میوه پرتقال برای پوست و گوشت میوه تعریف شد. پس از آن در محیط طراحی نرم‌افزار انسیس، مدل هندسی سه بعدی طراحی شد. برای این منظور پرتقال به صورت متقارن^۱ (کروی^۲) در نظر گرفته شد، به طوری که شعاع پرتقال گروه بزرگ ۳۸ میلی‌متر و شعاع پرتقال گروه کوچک ۳۰ میلی‌متر بر اساس ابعاد به دست آمده در آزمایشگاه انتخاب شد. سپس در نوار ابزار Tools از گزینه Enclosure برای ایجاد پوسته (ضخامت پوست ۳ میلی‌متر) استفاده و یک شکل سه بعدی ایجاد شد. جرم مدل هندسی ایجاد شده با استفاده از نرم‌افزار انسیس برای گوشت و پوست در پرتقال‌های گروه بزرگ به ترتیب ۲۰۴/۵۶ و ۵۳/۵۵۲ گرم و در پرتقال گروه کوچک ۱۰۰/۶۶ و ۳۴/۰۶۶ گرم به دست آمد. این مقادیر با میانگین

1- Symmetrical

2- Spherical

3- Tetrahedral Element

4- Hexahedral Element



شکل ۳- نمای هندسه المان‌ها (الف) المان شش وجهی و (ب) المان چهار وجهی

Fig. 3 - Geometry view of elements, a) Hexagonal element and b) Tetrahedral element

شبکه‌بندی عالی است، اگر در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۵ باشد کیفیت شبکه‌بندی بسیار خوب است. بین ۰/۵ تا ۰/۸ خوب، بین ۰/۸ تا ۰/۹۵ قابل قبول، بین ۰/۹۵ تا ۰/۹۷ بد و اگر در محدوده ۰/۹۵ تا یک باشد کیفیت شبکه‌بندی پذیرفتنی نیست.

پس از شبکه‌بندی و ایجاد اتصال بین بخش‌های گوشت و پوست به منظور فراهم کردن جسمی واحد در مدل‌سازی میوه پرتقال، در مرحله آخر در قسمت Analysis Settings، ۲۰ مود اول محاسبه شد تا با استفاده از نرم‌افزار انسیس با کلیک کردن روی گزینه حل، فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی به دست آید (شکل ۴).

در جدول ۲ مشخصات شبکه‌بندی بر اساس سه معیار مهم نسبت ابعاد^۱، نسبت ژاکوبین^۲ و چولگی^۳ که برای سنجش کیفیت شبکه‌بندی^۴ هستند آورده شده است. معیار نسبت ابعاد هر چه کوچک‌تر باشد شبکه‌بندی کیفیت بهتری دارد. معیار نسبت ابعاد^۵ به طور میانگین باید برای شبکه‌بندی به صورت میانگین ۱/۸ باشد. نسبت ژاکوبین عددی بین ۱- تا ۱+ است که نزدیک بودن این نسبت به عدد ۱+ نشان‌دهنده این است که المان‌ها به خوبی انتخاب شده‌اند. یکی دیگر از معیارهای کیفیت شبکه‌بندی، چولگی است که عددی بین صفر تا یک است. چولگی اگر در محدوده صفر تا ۰/۲۵ باشد کیفیت

جدول ۲- مشخصات شبکه‌بندی بر اساس پارامترهای کیفیت شبکه‌بندی

Table 2 - Networking specifications based on network quality parameters

چولگی Skewness	ژاکوبین Jacobian ratio	نسبت ابعاد Aspect ratio	
0.2396	0.97429	1.8967	گروه بزرگ (Large group)
0.22248	0.98277	1.7625	گروه کوچک (Small group)

1- Aspect ratio

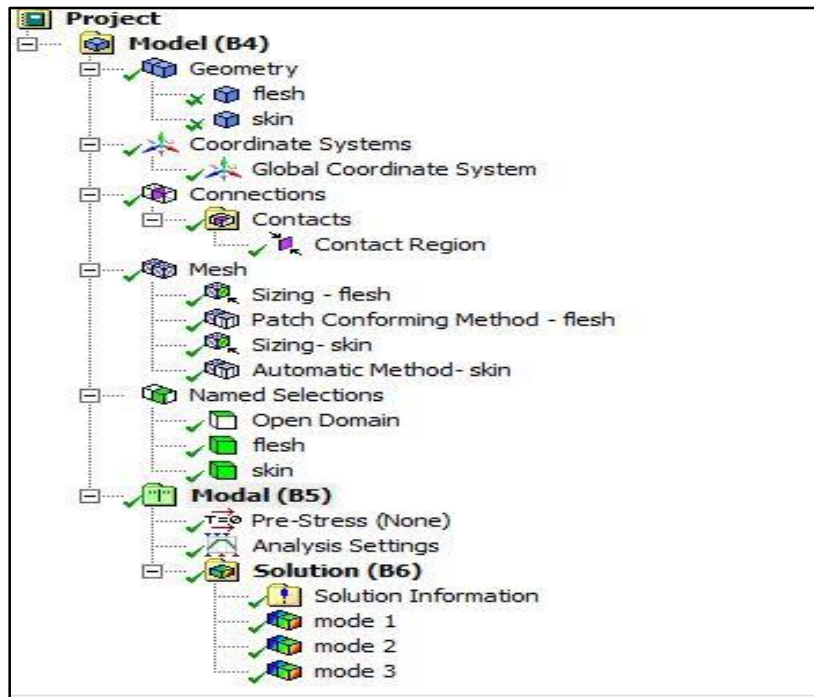
2- Jacobian ratio

3- Skewness

4- Mesh Quality

5- Aspect ratio

6- Solve



شکل ۴- مراحل شبیه‌سازی میوه پرتقال در نرم‌افزار انسیس

Fig. 4- Orange fruit simulation steps in ANSYS software

نتایج و بحث

پرتقال‌های گروه کوچک و بزرگ متفاوت است یا خیر، با مراجعه به آزمون $(-3/22)$ Z در سطح خطای کمتر از $0/01$ معنی‌دار است ($\text{Sig}=0/001$). به عبارت دیگر می‌توان گفت که اختلاف فرکانس‌های طبیعی در دو گروه با اطمینان $0/99$ از نظر آماری معنی‌دار است. این نتیجه نشان دهنده رد فرضیه H_0 تحقیق در مورد برابری فرکانس‌های طبیعی در هر دو گروه است.

جرم شتاب‌سنج می‌تواند به طور قابل توجهی بر ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ای که روی آن نصب شده تأثیر گذارد که اثر بارگذاری جرم نامیده می‌شود که تمایل به کاهش فرکانس‌های طبیعی اندازه‌گیری شده دارد. قواعد کلی این است که جرم شتاب‌سنج باید کمتر از یک دهم جرم مؤثر سازه‌ای باشد که به آن متصل است (Baharin & Rahman, 2009). بر اساس این اصل، جرم شتاب‌سنج سه محوره ($10/5$)

اولین مود ارتعاشی توسط دستگاه چهار کاناله پردازش سیگنال برای پرتقال‌های گروه بزرگ در فرکانس طبیعی $125/4$ هرتز حس شده و مود دوم و سوم به ترتیب دارای فرکانس‌های طبیعی $146/9$ و $180/4$ هرتز هستند. در پرتقال‌های گروه کوچک اولین مود ارتعاشی در فرکانس طبیعی $152/2$ هرتز حس شده و مود دوم و سوم به ترتیب دارای فرکانس‌های طبیعی $188/8$ و $242/2$ هرتز هستند. با توجه به اهمیت فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی میوه پرتقال، سه فرکانس طبیعی اول به دست آمده از پرتقال‌های بزرگ و کوچک با استفاده از آزمون فرضیه‌های آماری ناپارامتریک^۱ ویلکاکسون^۲ ارزیابی گردید. با استفاده از آزمون فرضیه‌های آماری ناپارامتریک ویلکاکسون برای پی‌بردن به اینکه تفاوت فرکانس‌های طبیعی در

1- Non-parametric Statistical Hypothesis Test

2- Wilcoxon

شانزدهم ۱۸۷/۵۰ هرتز (به عنوان مود دوم) و فرکانس‌های طبیعی مودهای هفدهم تا نوزدهم ۲۴۸/۳۰ هرتز به عنوان مود سوم در نظر گرفته شد. نتایج این تحقیق با نتایج به دست آمده از سایر مطالعات (Wang et al., 2017; Zhang et al., 2018) همخوانی دارد.

برای درک بهتر مقادیر فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از شبیه‌سازی‌های آنالیز مودال اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار انسیس برای پرتقال‌های گروه بزرگ در شکل ۵ الف و ب، مقادیر فرکانس‌های مودال به صورت نمودار میله‌ای با توجه به مودهای ارتعاشی رسم شده است که مودهای اول، دوم و سوم در شکل ۵ به ترتیب با رنگ‌های قرمز، بنفش و سبز نمایش داده شده است.

اعتبارسنجی نتایج اجزای محدود

به منظور اعتبارسنجی فرکانس‌های طبیعی تجربی (آزمایشگاهی) و شبیه‌سازی (آنالیز مودال)، مقایسه بین این فرکانس‌ها نشان داد که در پرتقال‌های گروه بزرگ مودهای اول، دوم و سوم به ترتیب دارای فرکانس‌های طبیعی تجربی ۱۲۵/۴، ۱۴۶/۹ و ۱۸۰/۴ هرتز و فرکانس‌های شبیه‌سازی ۱۳۳/۸۰، ۱۴۶/۱۶ و ۱۹۶/۶۶ هرتز هستند که کمترین اختلاف در مود دوم (۵/۰ درصد) و بیشترین اختلاف در مود سوم (۹/۰۱ درصد) مشاهده می‌شود. در پرتقال‌های گروه کوچک مودهای اول، دوم و سوم به ترتیب دارای فرکانس‌های طبیعی تجربی ۱۵۲/۲، ۱۸۸/۸ و ۲۴۲/۲ هرتز و فرکانس‌های شبیه‌سازی ۱۶۷/۷۹، ۱۸۷/۵۰ و ۲۴۸/۳۰ هرتز هستند که کمترین و بیشترین اختلاف بین فرکانس‌های طبیعی تجربی و شبیه‌سازی در مودهای دوم و اول به ترتیب ۰/۶۸ درصد و ۱۰/۲۴ درصد مشاهده می‌شود. همان‌طور که

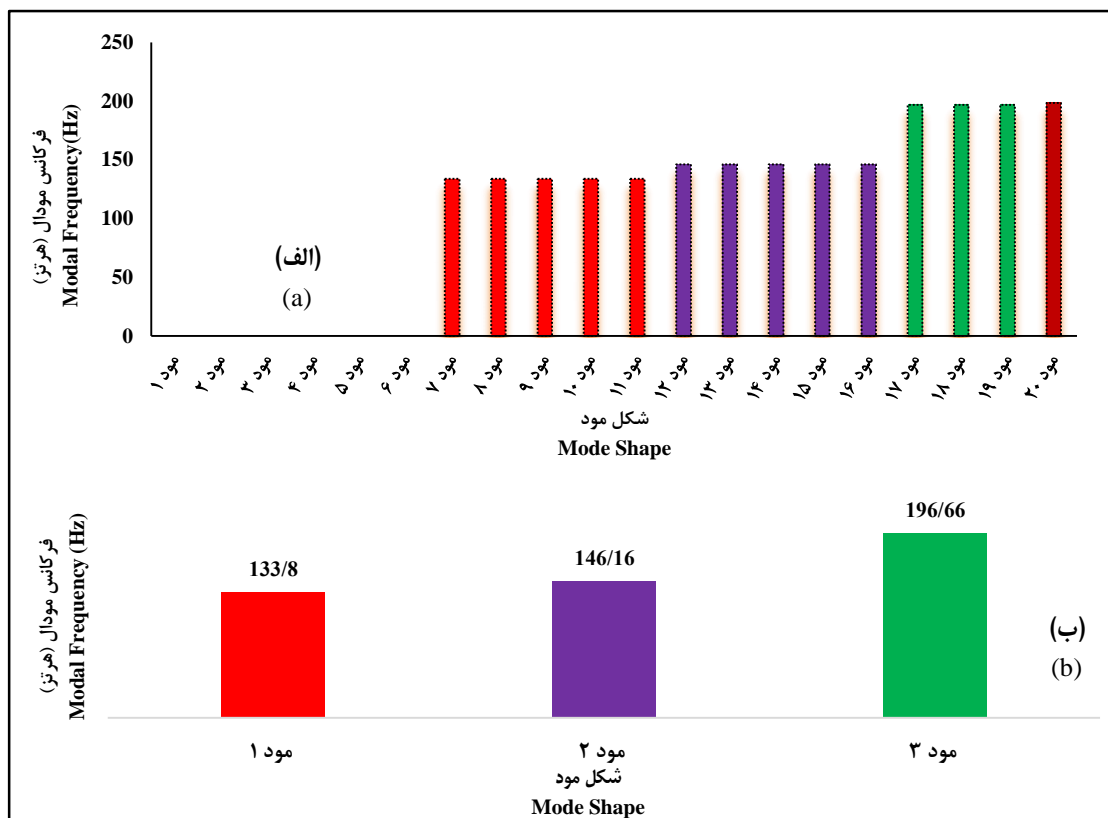
گرم) متصل به نمونه‌های پرتقال کمتر از یک دهم جرم نمونه‌های پرتقال در هر دو گروه کوچک و بزرگ است، بنابراین می‌توان از تأثیر جرم شتاب‌سنج بر فرکانس‌های طبیعی چشم‌پوشی کرد.

به منظور به دست آوردن فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای متناظر با هریک از فرکانس‌های طبیعی با استفاده از ماژول مودال نرم‌افزار انسیس، ۲۰ مود اول به دست آمد. در هر دو گروه کوچک و بزرگ فرکانس طبیعی ۶ مود اول تقریباً صفر هستند (سه فرکانس اول مربوط به حرکت در راستای محورهای مختصات و سه فرکانس دوم مربوط به حرکت چرخشی حول محورهای مختصات) که نشان می‌دهد که طراحی به درستی صورت گرفته زیرا میوه پرتقال به صورت کاملاً آزاد در نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی شده است.

با توجه به این که در مرحله شبکه‌بندی در نوع و اندازه شبکه دقت و حساسیت خوبی صورت گرفته است (استقلال از شبکه برای نتایج خروجی)، فرکانس‌های طبیعی مودهای هفتم تا یازدهم در پرتقال‌های گروه بزرگ ۱۳۳/۸۰ هرتز (به عنوان مود اول)، مود دوازدهم تا شانزدهم ۱۴۶/۱۶ هرتز (به عنوان مود دوم) و فرکانس‌های طبیعی مودهای هفدهم تا نوزدهم ۱۹۶/۶۶ هرتز به عنوان مود سوم در نظر گرفته شد. باید توجه داشت که با توجه به ساختار پیوسته میوه پرتقال، در واقع این جسم دارای درجه‌های آزاد بی‌شماری است، بنابراین تعداد بی‌نهایت فرکانس طبیعی و شکل مود وجود دارد. اما به دلیل ناپیوستگی مدل مشبک نمونه‌های میوه پرتقال، تعداد فرکانس‌های طبیعی محدود است. در پرتقال‌های گروه کوچک، فرکانس‌های طبیعی مودهای هفتم تا یازدهم ۱۶۷/۷۹ هرتز (به عنوان مود اول)، مود دوازدهم تا

بزرگ و کوچک به ترتیب ۰/۹۵۵۹ و ۰/۹۶۸۲ است (شکل ۶ الف و ب) که این نتایج می‌تواند مزیت قابل توجهی برای طراحی ماشین‌های برداشت و پس از برداشت در مقیاس تجاری برای میوه پرتقال باشد.

پیداست اختلاف بین این فرکانس‌ها برای هر دو گروه پرتقال‌های بزرگ و کوچک قابلیت اعتماد بالایی دارد به طوری که مدل رگرسیون خطی و ضریب تعیین R^2 ناشی از مقایسه بین فرکانس‌های تجربی و مودال برای پرتقال‌های گروه



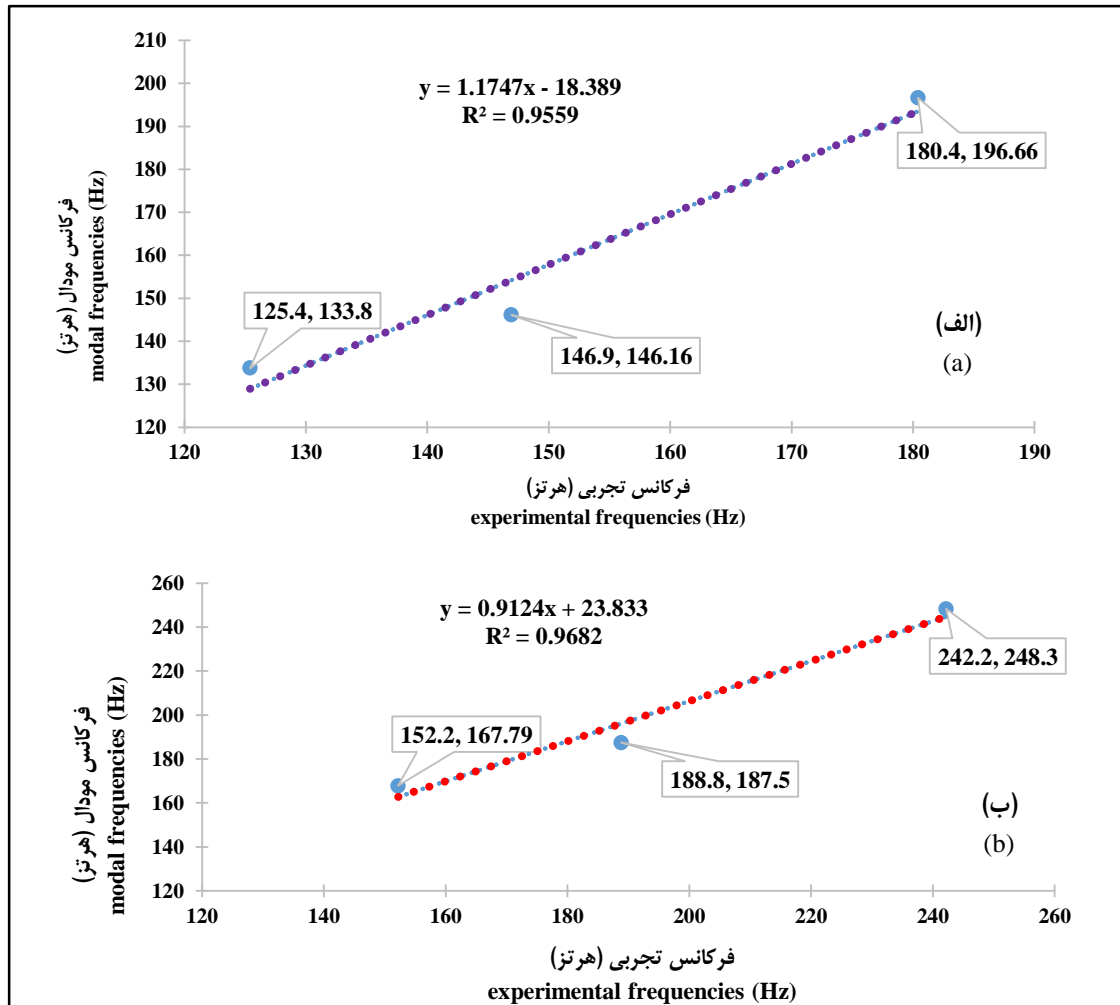
شکل ۵- الف) فرکانس‌های طبیعی آنالیز مودال در مقابل مودهای ارتعاشی پرتقال‌های گروه بزرگ و ب) سه مود اول در پرتقال‌های گروه بزرگ

Fig. 5- a) Natural frequencies of modal analysis versus vibration modes of large group oranges and b) First three modes in large group oranges

آنالیز پاسخ هارمونیک تحلیلی است دینامیکی خطی که برای تعیین پاسخ سیستم به تحریک در فرکانس‌های خاص استفاده می‌شود، که به آن تحلیل پاسخ فرکانس نیز گفته می‌شود. پیش‌نیاز تجزیه و تحلیل پاسخ هارمونیک، آنالیز مودال است زیرا فرکانس‌های ورودی مورد نیاز برای تجزیه و تحلیل پاسخ هارمونیک، نتایج تحلیل مودال هستند.

آنالیز پاسخ هارمونیک در میوه پرتقال

تاکنون هیچ‌گونه مطالعه‌ای به منظور به دست آوردن فرکانس‌های طبیعی و مودهای ارتعاشی با استفاده از تابع پاسخ هارمونیک برای میوه‌ها گزارش نشده است. تجزیه و تحلیل پاسخ هارمونیک مدل المان محدود با استفاده از روش ریشه‌مربعات (SPSS) بر اساس تجزیه و تحلیل مودال اجرا می‌شود.



شکل ۶- مقایسه بین فرکانس‌های تجربی و مودال به همراه رگرسیون‌های خطی و ضریب تعیین پرتقال‌های الف) گروه بزرگ ب) گروه کوچک

Fig. 6- a) Comparison between experimental and modal frequencies along with linear regressions and coefficient of determination of oranges a) Large group and b) Small group

ماشین‌ها، وسایل نقلیه یا تجهیزات فرآیندی استفاده می‌شود که تحت بارگذاری هارمونیک پیوسته قرار دارند.

برای شبیه‌سازی تجزیه و تحلیل هارمونیک میوه پرتقال ویژگی‌های مواد، هندسه، شبکه‌بندی و شرایط مرزی، مشابه شرایطی استفاده شد که در قسمت تجزیه و تحلیل مودال (مراحل شبیه‌سازی المان محدود) توضیح داده شده است. بر اساس نتایج آنالیز مودال می‌توان بر اساس مقادیر کمینه و بیشینه فرکانس طبیعی به دست آمده از آنالیز

با توجه به تجزیه و تحلیل با استفاده از نتایج محاسبه شده قبلی، تجزیه و تحلیل پاسخ هارمونیک نوعی از تجزیه و تحلیل راه‌اندازی مجدد است که از بر هم نهی مودال برای محاسبه نتایج خود استفاده می‌کند. در تحلیل پاسخ هارمونیک، بار اعمال شده به مدل خطی یک بار سینوسی حالت پایدار در یک فرکانس معین است. بارها ممکن است با یکدیگر خارج از فاز باشند، اما تحریک در یک فرکانس شناخته شده است. تحلیل پاسخ هارمونیک معمولاً برای محاسبه تنش‌های ناشی از عملکرد حالت پایدار

گروه بزرگ با اختلاف کمتر از ۱۰ درصد و در پرتقال‌های گروه کوچک با اختلاف حدود ۶ درصد مطابقت دارند (جدول‌های ۳ و ۴). برابر رابطه $\Delta\Omega = 2\pi \frac{f_{\max}-f_{\min}}{n}$ که در آن $\Delta\Omega$ بیانگر فواصل فرکانسی و $f_{\max}-f_{\min}$ (محدوده فرکانسی) و n بیانگر تعداد فواصل فرکانسی است، می‌توان به این نکته اشاره کرد که این اختلاف‌های جزئی بین فرکانس‌های به دست آمده با استفاده از آنالیز مودال اجزای محدود و آنالیز پاسخ هارمونیک به دلیل تعیین فواصل حل است و می‌توان به این نکته نیز اشاره کرد با توجه به این که شتاب‌سنج سه محوره از دقت و حساسیت بالایی داشته است. این اختلاف بین فرکانس‌های آنالیز مودال و هارمونیک در نرم‌افزار انسیس در هر دو گروه از پرتقال‌های گروه کوچک و بزرگ کمتر از ۱۰ درصد به دست آمده است.

در شبیه‌سازی میوه پرتقال در نرم‌افزار انسیس در ماژول‌های مودال و هارمونیک، فرکانس‌های مربوط به دست آمدند که مقایسه بین فرکانس‌های مودال و هارمونیک به منظور اعتبارسنجی محدوده فرکانسی به دست آمده و نیز داده‌های شتاب‌سنج سه محوره صورت گرفت. اختلاف بین فرکانس‌های مودال و هارمونیک در پرتقال‌های گروه بزرگ برای موده‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۲/۰۱ درصد، ۷/۷۵ درصد و ۹/۲۳ درصد و این اختلاف برای پرتقال‌های گروه کوچک به ترتیب ۳/۴۵ درصد، ۵/۶ درصد و ۵/۷۶ درصد به دست آمد.

مودال، پاسخ فرکانسی را بر اساس داده‌های شتاب‌سنج سه محوره برای پرتقال گروه بزرگ $a_z = 1/7 \frac{m}{s^2}$, $a_y = 4/5 \frac{m}{s^2}$, $a_x = 38/16 \frac{m}{s^2}$ و برای پرتقال گروه کوچک $a_z = 57/31 \frac{m}{s^2}$, $a_y = 1/75 \frac{m}{s^2}$, $a_x = 0$ به دست آورد. نمودار فرکانس طبیعی در مقابل شتاب به صورت شکل‌های ۷ و ۸ برای پرتقال‌های گروه بزرگ و کوچک رسم گردید. بدین منظور پس از وارد کردن مقادیر کمینه و بیشینه فرکانس طبیعی به دست آمده از آنالیز مودال در مرحله قبلی و همچنین وارد کردن داده‌های شتاب‌سنج سه محوره در نرم‌افزار انسیس، نمودار پاسخ فرکانسی بر حسب شتاب رسم گردید.

برای پرتقال تامسون گروه بزرگ محدوده فرکانسی در محدوده فرکانس کمینه صفر و فرکانس ماکزیمم ۲۱۰ هرتز و فواصل حل ۲۰^۱ و برای پرتقال تامسون گروه کوچک محدوده فرکانسی در محدوده فرکانس کمینه صفر و فرکانس ماکزیمم ۲۷۰ هرتز و فواصل حل ۱۵ در نظر گرفته شد.

همان‌طور که از نمودار شکل‌های ۷ و ۸ پیداست، نقاط قله در نمودار تابع پاسخ فرکانسی بر حسب شتاب که به ترتیب معرف فرکانس‌های هارمونیک موده‌های اول، دوم و سوم هستند به ترتیب برای پرتقال‌های گروه بزرگ ۱۳۶/۵، ۱۵۷/۵ و ۱۷۸/۵ هرتز و برای پرتقال‌های گروه کوچک ۱۶۲، ۱۹۸ و ۲۳۴ هرتز است که با مقادیر به دست آمده از فرکانس‌های آنالیز مودال در پرتقال‌های

جدول ۳- مقایسه فرکانس‌های مودال (بر اساس نرم‌افزار انسیس) و پاسخ تابع فرکانسی بر حسب شتاب در آنالیز پاسخ هارمونیک (بر اساس نرم‌افزار انسیس) برای پرتقال‌های گروه بزرگ

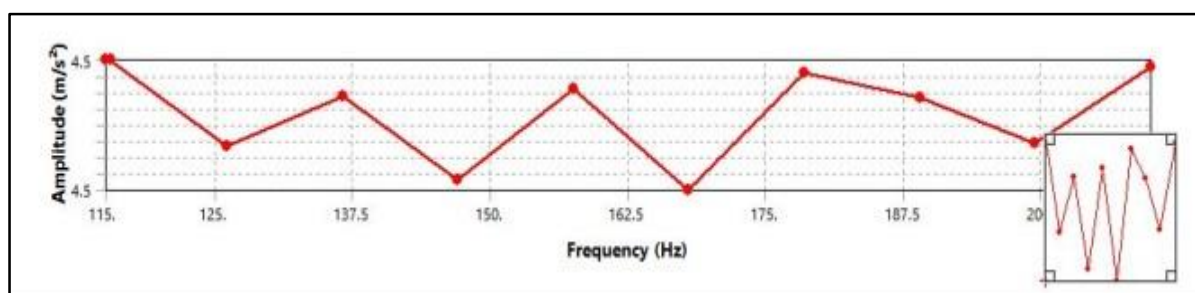
Table 4 - Comparison of modal frequencies (based on ANSYS software) and frequency function response in terms of acceleration in harmonic response analysis (based on ANSYS software) for large group orange

اختلاف فرکانس مودال و هارمونیک (درصد) Difference between modal and harmonic frequencies (%)	فرکانس هارمونیک (هرتز) Harmonic frequency (Hz)	فرکانس مودال (هرتز) Modal frequency (Hz)	مود Mode
2.01	136.5	133.80	مود اول
7.75	157.5	146.16	مود دوم
9.23	178.5	196.66	مود سوم
6.33	میانگین اختلاف فرکانس‌های مودال و هارمونیک در سه مود اول		

جدول ۴- مقایسه فرکانس‌های مودال (بر اساس نرم‌افزار انسیس) و پاسخ تابع فرکانسی بر حسب شتاب در آنالیز پاسخ هارمونیک (بر اساس نرم‌افزار انسیس) برای پرتقال‌های گروه کوچک

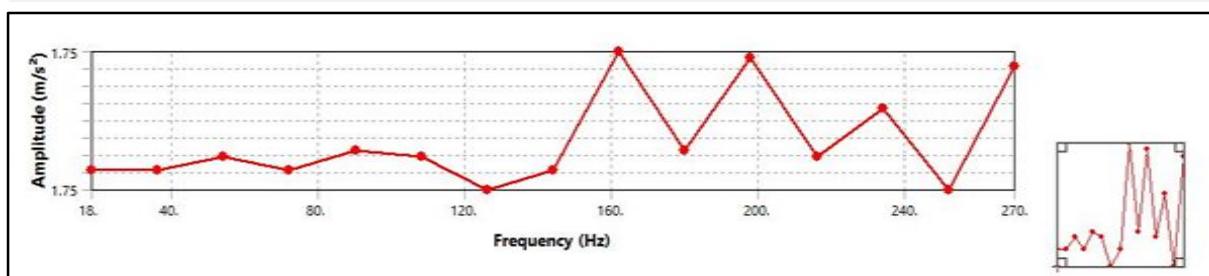
Table 5 - Comparison of modal frequencies (based on ANSYS software) and frequency function response in terms of acceleration in harmonic response analysis (based on ANSYS software) for small group oranges

اختلاف فرکانس مودال و هارمونیک (درصد) Difference between modal and harmonic frequencies (%)	فرکانس هارمونیک (هرتز) Harmonic frequency (Hz)	فرکانس مودال (هرتز) Modal frequency (Hz)	مود Mode
3.45	162	167.79	مود اول
5.6	198	187.5	مود دوم
5.76	234	248.3	مود سوم
4.93	میانگین اختلاف فرکانس‌های مودال و هارمونیک در سه مود اول		



شکل ۷- نمودار شتاب بر حسب فرکانس طبیعی با استفاده از آنالیز پاسخ فرکانسی برای پرتقال تامسون گروه بزرگ

Fig. 7- Acceleration graph in terms of natural frequency using frequency response analysis for large group Thomson oranges



شکل ۸- نمودار شتاب بر حسب فرکانس طبیعی با استفاده از آنالیز پاسخ فرکانسی برای پرتقال تامسون گروه کوچک

Fig. 8- Acceleration graph in terms of natural frequency using frequency response analysis for small group Thomson oranges

نتیجه‌گیری

تامسون در حدود ۱۰ درصد به دست آمد. به عبارت دیگر، میانگین اختلاف فرکانس‌های مودال و هارمونیک در سه مود اول برای پرتقال‌های گروه بزرگ و کوچک کمتر از ۷ درصد است. بنابراین، با توجه به اختلاف قابل قبول بین مدل اجزای محدود و روش تجربی مورد استفاده در این مطالعه می‌تواند به عنوان روشی مقرون به صرفه و قابل اعتماد به منظور طراحی ماشین‌های برداشت میوه پرتقال و بهینه‌سازی مکانیزم‌های پس از برداشت و حمل و نقل به کار رود.

- مدل اجزای محدود ایجاد شده به عنوان مدل پایه برای بررسی ویژگی‌های دینامیکی میوه پرتقال بدون نیاز به تست‌های تجربی می‌تواند به کار رود.
- پیچیدگی‌های بیشتر سیستم دینامیکی را می‌توان برای پرداختن به طیف گسترده‌ای از سناریوهای ضربه‌ای ایجاد کرد که می‌تواند در عملیات پس از برداشت امکان‌پذیر باشد.

- ماکزیمم و مینیموم اختلاف بین فرکانس‌های طبیعی متوالی در پرتقال‌های گروه بزرگ و کوچک به ترتیب $53/4$ و $21/5$ هرتز است. ماکزیمم و مینیموم اختلاف بین فرکانس‌های تجربی (آزمایشگاهی) و عددی (آنالیز مودال) در پرتقال‌های گروه بزرگ به ترتیب $9/01$ درصد و $0/5$ درصد و این اختلاف برای پرتقال‌های گروه کوچک به ترتیب $10/24$ درصد و $0/68$ درصد است. در این تحقیق به منظور اعتبارسنجی فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از آنالیز مودال اجزای محدود، با استفاده از آنالیز پاسخ هارمونیک و داده‌های شتاب‌سنج با تعیین کردن محدوده فرکانس و نیز وارد کردن مقادیر داده‌های شتاب‌سنج در نرم‌افزار انسیس، نمودار فرکانس طبیعی بر حسب شتاب‌سنج رسم گردید. اختلاف فرکانس‌های آنالیز مودال و پاسخ هارمونیک برای هر دو گروه از پرتقال‌های رقم

تعارض منافع

نویسندگان در خصوص مقاله ارائه شده به طور کامل از سوء اخلاق نشر، سرقت ادبی و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافع تجاری در این راستا وجود ندارد.

مراجع

Ahmadi, E., & Barikloo, H. (2016a). Viscoelastic finite element analysis of the dynamic behavior of apple under impact loading with regard to its different layers. *Computers & Electronics in Agriculture*, 121, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.11.017>.

- Ahmadi, E., & Barikloo, H. (2016b). Mechanical property evaluation of apricot fruits under quasi-static & dynamic loading. *Journal of Agricultural Machinery*, 6(1), 139-152. <https://doi.org/10.22067/jam.v6i1.29489>.
- Albaar, N., Budiastira, I. W., & Hariyadi, Y. (2016). Influence of secondary packaging on quality of carrots during transportation. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 9, 348-352.
- Aliasgarian, S., Ghassemzadeh, H. R., Moghaddam, M., & Ghaffari, H. (2015). Mechanical damage of strawberry during harvest & postharvest operations. *Acta Technologica Agriculturae*, 18, 1-5. <https://doi.org/10.1515/ata-2015-0001>.
- Anon. (2015). Agriculture database of FAO-STAT. Available at <http://FAOSTAT.FAO.ORG>.
- Baharin, N. H., & Rahman, R. A. (2009). Effect of accelerometer mass on thin plate vibration. *Jurnal Mekanikal*, 29, 100-111. <https://www.researchgate.net/publication/44707632>.
- Celik, H. K., Rennie, A. E. W., & Akinci, I. (2011). Deformation behaviour simulation of an apple under drop case by finite element method. *Journal of Food Engineering*, 104, 293-298. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.020>.
- Chiputula, J. (2009). Evaluating mechanical damage of fresh potato during harvesting & postharvest handling. (*M. Sc. Thesis*), University of Florida.
- Gao, Y., Song, C., & Rao, X. (2018). Image processing-aided fea for monitoring dynamic response of potato tubers to impact loading. *Computers & Electronics in Agriculture*, 151, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.027>.
- Gyasi, S., Fridley, R. B., & Chen, P. (1981). Elastic & viscoelastic Poisson's ratio determination for selected citrus fruits. *Transactions of the ASAE*, 24(3), 747-750. <https://doi.org/10.13031/2013.34332>.
- Jung, H. M., & Park, J. G. (2012). Effects of Vibration stress on the quality of packaged apples during simulated transport. *Journal of Biosystems Engineering*, 37, 44-50. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.111918>.
- Malalasekera, W., & Versteeg, H. K. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics*. 2nd Ed. The finite volume method, Harlow: Prentice Hall.
- Mohsenin, N. N. (1978). *Physical properties of food and agricultural materials*. 2nd Revised and Update Edition. Gordon and Breach Science Pub. New York.
- Namdari Gharaghani, B., Maghsoudi, H., & Mohammadi, M. (2020). Ripeness detection of orange fruit using experimental & finite element modal analysis. *Scientia Horticulturae*, 261, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108958>.
- Santos, F. L., Scinocca, F., & Marques, D. S. (2021). Modal properties of macaw palm fruit-rachilla system: An approach by the stochastic finite element method (SFEM). *Computers & Electronics in Agriculture*, 184, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106099>.
- Soleimani, B., & Ahmadi, E. (2014). Measurement & analysis of truck vibration levels as a function of packages locations in truck bed & suspension. *Computers & Electronics in Agriculture*, 109, 141-147. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.09.009>.
- Song, H. Z., Wang, J., & Li, Y. H. (2006). Studies on vibration characteristics of a pear using finite element method. *Journal of Zhejiang University Science*, 7, 491-496. <https://doi.org/10.1631/jzus.2006.b0491>.
- Velloso, N. S., Magalhães, R. R., Santos, F. L., & Santos, A. A. R. (2020). Modal properties of coffee plants via numerical simulation. *Computers & Electronics in Agriculture*, 175, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105552>.

- Wang, F., Ma, S., Wei, W., Zhang, Y., & Zhang, Z. (2017). Frequency sweep test & modal analysis of watermelon during transportation. *International Journal of Food Engineering*, 13(5). <https://doi.org/10.1515/ijfe-2016-0362>.
- Yousefi, S., Farsi, H., & Kheiralipour, K. (2016). Drop test of pear fruit: Experimental measurement & finite element modelling. *Biosystems Engineering*, 147, 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.03.004>.
- Zhang, H., Wu, J., Zhao, Z., & Wang, Z. (2018). Nondestructive firmness measurement of differently shaped pears with a dual-frequency index based on acoustic vibration. *Postharvest Biology & Technology*, 138, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.12.002>.



Research Paper

Software Analysis of the Harmonic Response of Orange Fruit to Determine Natural Frequencies to Prevent Damage During Transportation

V. Kahrizi*, E. Ahmadi and A. R. Shoostari

*Corresponding Author: Ph. D. of Mechanic Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina, Hamadan, Iran. Email: vahidkahrizi2012@gmail.com

Received: 8 December 2024, Accepted: 15 March 2025

<https://doi.org/10.22092/amsr.2025.367934.1508>

Abstract

The design and development of agricultural machinery is directly related to the biological properties of agricultural products. Without knowledge of the dynamic properties, engineers and designers must use experimental methods to design agricultural machinery and equipment, which is inefficient in terms of time and cost. The aim of this study is to identify the natural frequencies in two small and large groups of Thomson oranges using finite element modal analysis and harmonic response function using ANSYS software. To obtain the data required for simulation, an impact test was performed with a pendulum device. A three-dimensional geometric model of the orange was drawn in ANSYS software, and the physical and mechanical properties of the peel and flesh of the orange were determined separately. In order to validate the natural frequencies obtained from the modal analysis using harmonic response analysis and triaxial accelerometer data by determining the frequency range and also entering the accelerometer data values into ANSYS software, a natural frequency versus acceleration diagram was drawn. The difference between experimental frequencies and modal analysis for both groups is highly reliable, so that the coefficient of determination (R^2) resulting from the comparison of experimental frequencies and modal analysis for large and small group oranges is 0.9559 and 0.9682, respectively. Therefore, the finite element model and experimental method used in this study can be used as a cost-effective and reliable method for designing orange fruit harvesting machines and optimizing post-harvest and transportation mechanisms.

Keywords: Dynamic Damage, Natural Frequency, Post-Harvest Mechanisms, Vibration Modes



© 2024 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)